

ZELJKO ZAGORAC, Tehnički fakultet, Zagreb

ISTRAŽIVANJE VODE U KRŠU I UPOTREBA PRIMJENJENE GEOFIZIKE

Uvod

Voda je oduvijek bila jedna od najosnovnijih potreba ljudskog života. U životu pak modernog čovjeka bez dovoljno vode ograničene su mogućnosti razvoja industrije, pojačanja turizma, poboljšanja poljoprivrede i uopće povećanja životnog standarda. A vodom oskudijevaju upravo naši najljepši turistički krajevi, a to su ujedno krajevi, koji bi zbog svoje tople klime mogli davati krasne rezultate u različitim južnim kulturama samo kad bi bilo dovoljno vode.

Vodom oskudijeva čitava naša jadranska obala sa otocima i njeno zaleđe, Istra, Dalmacija, dijelovi Crne Gore i Hercegovine, pa i ostalih zemalja, jednom riječju čitavo područje našeg krša. Jugoslavija je poznata po cijelom svijetu zbog naročito karakterističnih krških pojava. A najtipičnija je krška pojava upravo odsutnost površinske vodene mreže. Vodu potrebnu za piće i druge potrebe mora se dopremiti iz daleka ili tražiti pod zemljom. A bušenje u vapnencu je mnogo skuplje nego li bušenje u mekanim formacijama. Osim toga voda je redovito mnogo dublje, a najveća opasnost je u tome što se često dešava, da se bušotinom u kršu uopće ne dođe do vode. Zbog toga je kod istraživanja vode u kršu, još u većoj mjeri nego li na drugim terenima, prije bušenja potreban temeljit geološki studij. U novije vrijeme ovaj geološki studij potpomognut je geofizičkim istraživanjima.

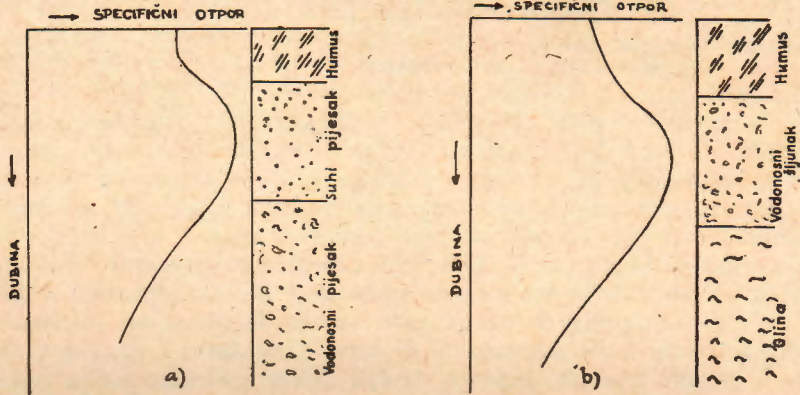
O geofizičkim istraživanjima u kršu nalazimo u literaturi dosta malo podataka, te nam u glavnom preostaje da sami razradimo odgovarajuće metode istraživanja. Svrha je ove radnje prikazati koliko je do sada u tome postignuto i kakvi problemi stoje pred nama u neposrednoj budućnosti.

U članku spominjem i neke mogućnosti istraživanja vode koje nisu geofizičke, ali su u glavnom u vezi s geofizičkim istraživanjima. Naslov članaka odabran je tako, da to uzima u obzir.

Geofizička istraživanja vode uopće.

Geofizička istraživanja za opskrbu vodom do sada su u svijetu postigla široku primjenu i o njima je već mnogo pisano (1, 2). Međutim redovito se tu radi o podzemnoj vodi koja cirkulira u među-

prostorima između zrna pijeska, šljunka, pješčenjaka i slično. U glavnom je zadatak u tome da se geofizičkim metodama odredi dubina nivoa podzemne vode i zatim na odgovarajućim mjestima vrši bušenje. I ako se u izvjesnoj mjeri upotrebljava i seizmička metoda, većinom se upotrebljavaju geoelektrične metode, među njima u prvom redu geoelektričko sondiranje metodom prividnog specifičnog otpora.



Čl. 1. Tipični diagrami geoelektričnog sondiranja na vodu

Sl. 1. prikazuje dva tipa rezultata geoelektričnog sondiranja na vodu. U sl. 1a ispod dobro vodivog humusa imamo suhi pijesak, koji se očituje velikim otporom, dok pijesak napojen vodom ima niski otpor. U sl. 1b naprotiv vodonosni šljunak ima veći tpor nego slojevi ispod i iznad njega. HEILAND (3) navodi još dva tipična diagrama, a moglo bi ih se naći i više. U svakom slučaju iz geoelektričnog istraživanja možemo izvesti zaključke o dubinama slojeva većeg ili manjeg otpora, ali ne i o tome koji je sloj vodonosan. Ovo posljednje može se zaključiti tek na temelju usporedbe sa okolnim bušotinama, ili iz nekih drugih geoloških podataka. Dobro izvedenim i interpretiranim geoelektričnim istraživanjima može se broj bušotina smanjiti na minimum.

Dobro prostudiranim geofizičkim istraživanjima, u vezi s bušenjem i geološkim radovima, može se osim dubine vodonosnih slojeva u izvjesnim granicama odrediti i količina i kvaliteta vode i svojstva stijene — rezervara vode (1).

Specifični problemi u kršu.

Kod geofizičkog istraživanja vode u kršu postavljaju se međutim specijalni problemi, koji rezultiraju iz specifične krške hidrografije. Kao što je poznato postoje dvije glavne teorije o podzemnoj

vodi u kršu. Jedna je teorija A. GRUNDA (4) koji zastupa mišljenje, da i u kršu postoji normalna podzemna voda, koja ispod izvjesnog nivoa ispunjava sve pukotine u kršu i komunicira u njima potpuno analogno, kao i u pijescima ili šljuncima. Druga je teorija KATZERA (5) koji smatra da se podzemna hidrografija u kršu sastoji u glavnom iz pojedinačnih većih podzemnih tokova. Osim toga postoji još nekoliko teorija, koje se u raznim detaljima razlikuju od ovih dviju.

Za geofizička je istraživanja od bitnog značenja s kakovom raspodjelom podzemne vode imamo posla. Ako se radi o horizontu podzemne vode, problem je sličan kao kod slučaja u sl. 1. Radi se naime o tome, da se odredi horizontalna granica dvaju ili više materijala različitog specifičnog otpora, i tu dolazi u obzir u prvom redu geoelektrično sondiranje metodom prividnog specifičnog otpora. Isto vrijedi i u slučaju kada postoji nekoliko vodenih horizonata jedan ispod drugoga. U drugom slučaju, t. j. ako imamo posla sa velikim vodenim tokovima ili velikim pukotinama ispunjenim vodom, oko kojih je suhi vapnenac, radi se o problemu pronalaska uskih električnih vodiča u lošije vodljivom okolnom materijalu. Ovdje također dolazi u obzir metoda prividnog otpora, ali, možda i u većoj mjeri, i elektromagnetska metoda.

Prema dosadanjim rezultatima istražnih bušenja (6), geoloških istraživanja, kao i do sada rijetko provedenih geofizičkih istraživanja (7) može se već sada zaključiti, da u nekim dijelovima našeg krša postoje vodeni horizonti, a u drugim postoje, bar na izvjesnim dublinama veći podzemni vodeni tokovi. Prema tome treba kod istraživanja računati sa obje spomenute mogućnosti.

Osim toga postoji u kršu niz mogućnosti istraživanja, koja mogu biti od koristi za opskrbu vodom. Pored električnog ispitivanja saliniteta i stim u vezi mogućnosti iskorišćavanja podmorskih izvora i poluslanih izvora na obali, o čemu će opširnije biti govora, spomenuo bih još mogućnosti geoelektričnog određivanja debljine mekanog nanosa. Naime, bušenje u mekanom materijalu (glini, zemlji crljenici, pijesku i sl.) naravno, mnogo je brže i jeftinije nego li bušenje u tvrdom vapnencu. Geoelektričkim sondiranjem može se izvanredno brzo i sigurno odrediti debljina ovakovog nanosa iznad vapnenca ili dolomita, na temelju čega se može odrediti bušotina na najdebljem nanosu, naravno u koliko nema drugih momenta, koji bi uvjetovali drugačije određivanje bušotine.

Od posebnog je interesa za istraživanje vode u kršu određivanje procenata volumena stijene ispunjenog vodom. Kao što je poznato električni otpor stijene u prirodi ovisi o specifičnom otporu krutog materijala stijene, zatim o otporu vode koja ispunjuje pukotine u stijeni, o procentu volumena pukotina, te o strukturi. Odgovarajućim računskim postupkom može se iz mjenjenog prividnog specifičnog otpora odrediti stvarni otpor prirodne stijene na određenoj dubini. Nadalje pomoću mjenjenog otpora čiste stijene i mjenjenog otpora podzemne vode može se izračunati procenat volumena

pukotina. U tu svrhu razni autori dali su nekoliko formula (8). Prilikom kontrole cementnih injekcija na gradnji hidroelektrane kod Kapruna u Australiji pokazala se je prema FRITSCHU (8) kao najbolja formula LORENTZ-LORENTZA (za malene procenete volumena pukotina).

U koliko nam nije poznat otpor podzemne vode niti otpor čistog materijala stijene možemo iz mjerenog specifičnog otpora stijene u prirodi doći bar do kvalitativnih zaključaka o rascupanosti, a to je vrlo važno za vjerojatnost pronalaženja vode. Ako na pr. u nekom vapnencu ili čak dolomitu imamo otpor od 10.000 Ω m, onda je jasno da se tu radi o vrlo kompaktnoj stijeni s vrlo malo pukotina, dakle praktički o stijeni bez vode, u kojoj je dakle bušenje bezizgledno. Naprotiv niski otpor, (na pr 500 Ω m) upućuje na vrlo rascupanu stijenu. Međutim prema THIELE-u (9) to još uvijek ne mora značiti da su pukotine ispunjene podzemnom vodom, koja se daje praktički iskoristiti, jer prema THIELE-u t. zv. gruba vlaga (Bergfeuchtigkeit) može u rascupanoj stijeni također biti uzrok niskog električnog otpora. Osim toga postoji uvijek mogućnost, da uzrok niskog otpora bude neki lapor, laporoviti vapnenac ili škriļjavac, koji je u tom slučaju opet nosilac vode. I ovdje sigurnost daju tek usporedbe s rezultatima mjerenja na bušotinama.

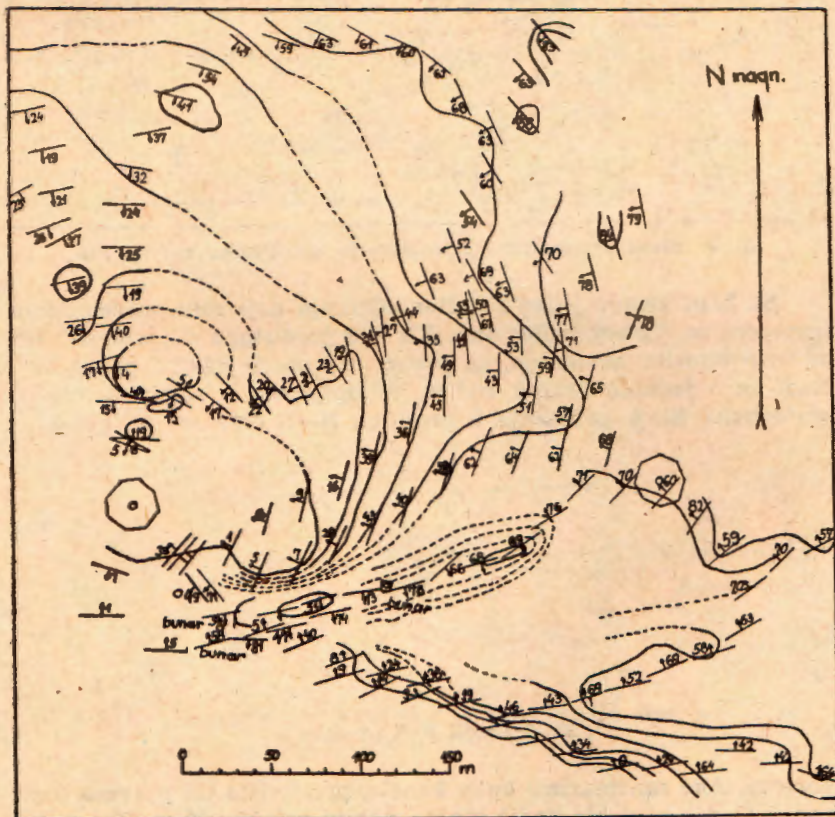
Potrebno je još naglasiti potrebu elektrokarotaže bušotina, a isto tako i određivanja električnog otpora jezgri, što bi trebalo provoditi na svim bušotinama. Vjerojatno bi taj rad mogao dati materijala za vrlo interesantne zaključke o krškim vodama.

Istraživanje vodenih horizonata u kršu.

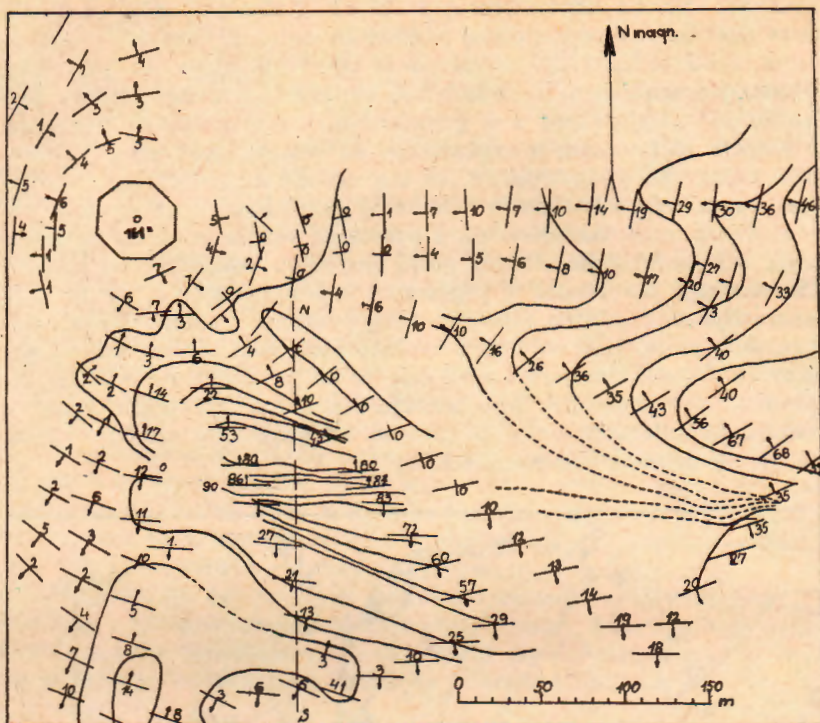
Geofizička istraživanja na otocima Brioni (7) pokazala su postojanje nekoliko vodenih horizonata. Istražna bušenja (6) potvrdila su rezultate geofizike. Prema tome u područjima koja imaju isti način pojave vode moramo mrežom geoelektričkih sondiranja pratiti horizonte podzemne vode i na odgovarajućim mjestima vršiti bušenja. Kod toga treba voditi računa o mogućnosti, da se odgovarajućom matematičkom analizom dođe do zaključka ne samo o dubinama nego i o jačoj ili manjoj rascupanosti, o većoj ili manjoj debljini horizonta i s time u vezi i o većoj ili manjoj količini vode. Krški tereni u kojima dolazi voda u horizontima svakako će biti neposredno zaleđe Briona, dakle istarsko kopno, odakle i potječe podzemna voda na Brionima. U kojoj mjeri postoje takovi horizonti i u drugim predjelima našeg krša pokazati će buduća istraživanja.

Međutim horizont podzemne vode postoji u krškim terenima i u nekim slučajevima neposredno ispod površine terena u rastresitim nanosima u poljima. Poznato je da na pr. na otoku Visu ima nanosa pijeska, a ima isto tako i glinovite zemlje crljenice. U slučaju kad pijesak leži na podlozi od nepropusne glinovite zemlje imati ćemo u pijesku podzemnu vodu koja se može analogno kon-

statirati. (Sl. 1.) Sličan slučaj je bio kod Komiže, gdje rastresiti materijal leži na nepropusnoj podlozi od sadrenih lapora i eruptiva. Budući da će rezultati istraživanja na Visu metodom prividnog otpora i magnetskom metodom biti obrađeni od drugih autora prikazao bih ovdje samo dva primjera elektromagnetskih mjerenja. Mjerenja su izvršena u organizaciji Zavoda za geofizička ispitivanja u Zagrebu sa instrumentima tog zavoda uz sudjelovnje namještenika zavoda i studenata tehničkog fakulteta, te uz stručnu pomoć sveuč. prof. Baturića. Sl. 2 prikazuje rezultate elektromagnetskog mjerenja u Komiškom polju metodom odašiljajućeg prstena (Sending). Na istoku i jugoistoku od prstena vidi se izrazita anomalija u nagibima i smjerovima pružanja vektora elektromagnetskog polja. Kod mjerenja na loše vidljivom terenu kutevi nagiba su oko 0° , a smjerovi pružanja su tangencijalni na odašiljajući prsten. One anomalije upozoravaju na dobar električni vodič u zemlji, podudaranje linije bunara sa osi anomalije upućuje na to, da je taj dobar vodič vodena žila.

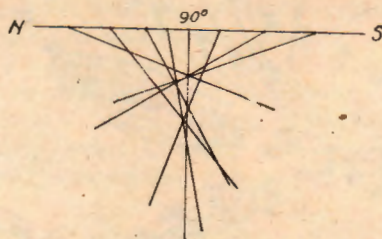


Sl. 2. Elektromagnetsko istraživanje na Komiškom polju, Vis



Sl. 3. Elektromagnetsko istraživanje na Velom polju, Vis

Sl. 3. prikazuje jedan rezultat mjerenja koje sam proveo istom metodom na Velom polju, otok Vis. Na jugoistoku od prstena vidi se vrlo izrazita anomalija, sa prelazom kuteva nagiba preko 90° . Radi se o jednom uskom vodiću, uklopljenom u slabije vodivom materijalu. Sl. 4. prikazuje u prosjeku N—S okomice na položaju



Sl. 4. Profil N-S sa slike 3

vektora. Ako zanemarimo upliv kabela, presjecišta tih pravaca daju vodić. Ovdje bi dakle vodić bio na dubini cca 15—30 m. Taj vodić može biti i glina, odnosno zemlja crljenica, ali u koliko bi se po-

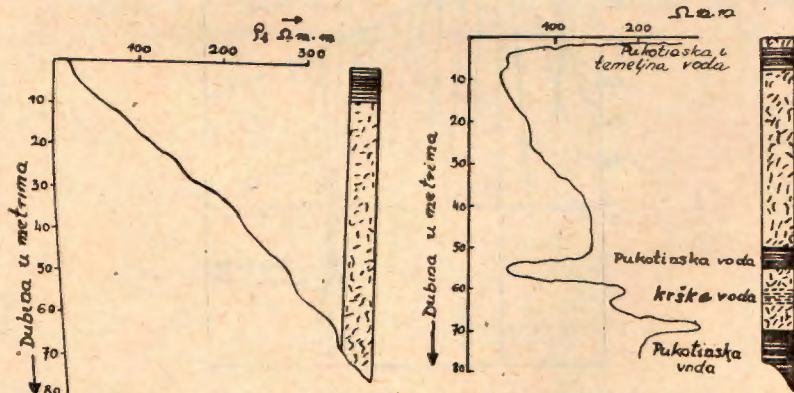
kazalo da ta glina ispunjava tektonsku pukotinu u dolomitu, koja se proteže dalje u dubinu, moglo bi se u većoj dubini očekivati, da je pukotina umjesto glinom ispunjena vodom.

Karakteristično je, da su kod elektromagnetskog istraživanja na otoku Visu sve indikacije čiji je uzrok razjašnjen izazvane materijalom plitko ispod površine zemlje. Da li će se odgovarajućim metodama moći zahvatiti i dublji vodiči, stvar je ispitivanja.

Želio bih ovdje spomenuti još mogućnosti indirektnog pronalaženja vode geofizičkim metodama. Naime, ako negdje u kršu osim vapnenca, pod zemljom imamo još i neke nepropusne tvari, na pr. škrljavce, lapore, laporovite vapnenice, magmatske stijene i t. d. nesumljivo je, da su one od odlučnog značenja u podzemnoj hidrografiji tog terena. Ovakovi slojevi međutim odlikuju se dobrom električkom provodljivošću i mogu se, u koliko su dovoljno debeli, konstatirati električkim mjerenjem i na više stotina metara dubine. U koliko je takva nepropusna barijera izgrađena od eruptiva može se istraživati i geomagnetskom metodom.

Istraživanja pukotinske vode i velikih podzemnih tokova

Metoda mjerenja prividnog specifičnog otpora može se upotrebiti i kod traženja pukotinske, kao i tekuće podzemne krške vode. Takova istraživanja provodili su još pred dvadeset godina njemački geofizičari LÖHNBERG i STERN na Cerknickom polju u Sloveniji (10). Prikazat ću ovdje dva dijagrama uzeta iz njihove radnje zajedno sa tumačenjem koje su dali autori:



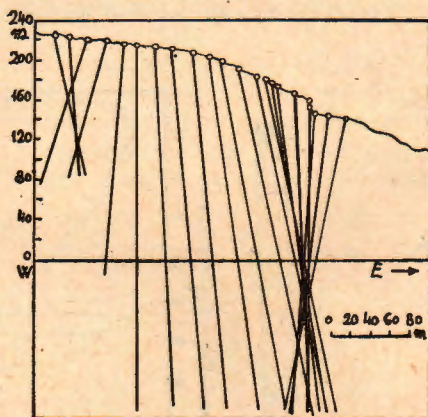
Sl. 5. Krivulja otpora na točku A Sl. 6. Krivulja otpora na točku B
(po LÖHNBERG-STERN-u)

Sl. 5 i 6. prikazuju diagrame geoelektričnog sondiranja metodom WENNER na dvjema različitim točkama. Sl. 5. pokazuje na suhu stijenu ispod temeljne vode, koja seže u posve malu dubinu.

Otpor se penje vrlo brzo i jednoliko. Sl. 6. pokazuje suh površinski sloj sa velikim otporom, a odmah ispod njega pukotinsku i podzemnu vodu zbog koje se smanjuje otpor. Do cca 50 m. dubine stijena je suha i otpor ρ_s raste. Između 50 i 60 m dubine jaki pad otpora pokazuje na pukotinske vode. Na cca 60 m pad otpora pokazuje na podzemnu tekuću kršku vodu, a na cca 70 m treći pad otpora uzrokovan je opet pukotinskom vodom.

Praćenje podzemnih vodotoka geofizičkim metodama često se je vršilo u inozemstvu, ali je o tome dosta malo objavljivano. Kako napominje KÖNIGSBERG (11) radilo se je redovito tako, da se kroz vodotok pusti struja i to tako, da se jedna elektroda stavi na mjesto gdje voda dolazi na površinu, a druga negdje u pravcu, gdje se pretpostavlja nastavak toka. Zatim se mjeri bilo ekvipotencijalne linije ili smjerove i nagibe elektromagnetskog polja. Kako navodi KÖNIGSBERG mjerenjem nagiba elektromagnetskog polja moglo se je sa jednog izvora u kršu pokraj mora pratiti vodeni tok, koji je davao indikacije do 4 km daljine. Međutim, budući da je geološko mišljenje bilo nepovoljno nije se vršilo bušenje. Na jednom drugom mjestu, također u kršu spominje KÖNIGSBERG da se je na 15 km daleko od mora u deformacijama nagiba elektromagnetskog polja moglo konstatirati tok koji je davao vodu jednom izvoru i to na 1 km daljine i preko 500 m visinske razlike. Dubina toka ispod površine zemlje procijenjena je na 15—20 m.

Jedan lijep primjer istraživanja podzemnog vodotoka u kršu daje H. REICH (12). Mjerenje je izvršila tvrtka Pipmayer metodom Elbof i to u našem kraju, u blizini Rijeke.



Sl. 7 — Primjer elektromagnetskog istraživanja toka podzemne rijeke po Reichu

Sl. 7. prikazuje jedan profil sa tog mjerenja. Profil je gotovo okomit na pravac kabela, kojim je slana struja u zemlju i koji se je nalazio skoro 2 km udaljen od profila. Pravci u svakoj točki predstavljaju okomice na položaj elektromagnetskog polja, a njihovo

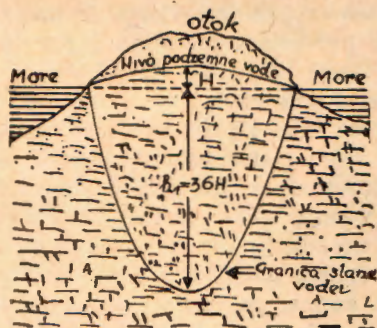
sjecište pokazuje približni položaj podzemnog vodića. Detaljniji opis i karte nalaze se u djelu H. REICHA (12). Kao što se vidi iz profila, podzemni vodotok trebao bi biti na dubini od cca 200 m pod zemljom. Nažalost niti iza ovog mjerenja nisu vršena bušenja koja bi potvrdila rezultat.

A. J. ZABOROVSKIJ daje jedan primjer (13) gdje je električnim mjerenjem praćen smjer i ustanovljena brzina proticanja jednog krškog podzemnog toka. Mjerenje je izvršeno kod Magnitogorska. Tok je nabušen na dubini od 36 m, u bušotinu je ubačena kamena sol koja je smanjila električni otpor vode, i zatim su mjerene ekvipotencijalne linije kod čega je jedna elektroda spuštena u bušotinu, a druga zabodena daleko od bušotine. Mjerenje je vršeno odmah poslije ubacivanja soli, te poslije 3, a zatim i poslije 12 sati. Iz dobivenih rezultata određen je smjer i brzina proticanja.

Kod istraživanja podzemnih vodenih tokova valja imati na umu, da se u većim dubinama tok može konstatirati samo ako ima vrlo velik presjek. Po mojem mišljenju trebalo bi najprije vršiti istraživanja na lakšim slučajevima, tamo gdje imamo razloga pretpostavljati velike tokove na razmjerno malim dubinama, a zatim, kad steknemo potrebna iskustva praktičkim radom na terenu i eksperimentalnim u laboratoriju mogli bi se upuštati u teže probleme.

Odnos slatke i slane vode

U obalskom i otočkom kršu kod korišćenja podzemne vode dolazi do još jedne teškoće: do ulaska morske vode i miješanja sa slatkom vodom. Razmotrit ćemo najprije kako izgleda granica između slatke i morske vode u pijesku. Sl. 8. preuzeta od KEILHACKA (14) prikazuje tu granicu ispod otoka.



Sl. 8 — Granica slatke i slane vode u pijesku (po KEILHACKU)

Odnos slatke i slane vode ovdje bazira na principu hidrostatske ravnoteže dviju tekućina koje se miješaju. Prema zakonima hidraulike $h_1 = \frac{G_2}{G_1 - G_2} \cdot H$, gdje su G_1 i G_2 specifične težine teku-

čina, a h_1 i H njihove visine. Ako uzmemo za slatku vodu $G_2 = 1.000$, a za vodu Sredozemnog mora prema FORCHHEIMERU (15) $G_1 = 1.028$ to izlazi $h_1 = 36 H$. U praksi se je pokazalo bušenjem na pješćanim otocima u Holandiji, da je odnos h_1 naprama H uglavnom odgovarao ovoj teoriji.

Postavlja se pitanje kako će izgledati ova granica na krškom otoku. Ako je stijena jako raspucana možemo smatrati da postoji normalni nivo podzemne vode (prema teoriji GRUNDA) i da će njena granica prema morskoj vodi također odgovarati principu u sl. 8. To bi značilo da je dovoljno bušiti negdje na sredini otoka i da moramo naići na slatku vodu. U slučaju da vode nema dovoljno preostaje nam još probiti miniranjem vezu do susjednih većih pukotina. KEILHACK uopće preporuča u krškim područjima kada se voda direktno nabuši minirati u bušotini, te daje i tehničke podatke o izvođenju tih miniranja (17). Budući da na sredini otoka obično ima polja čije su kote redovito dosta niske, dubina bušenja nije tako velika. Osim toga polja su pokrivena mekanim materijalom, obično zemljom crljenicom kroz koju je bušenje svakako brže i jeftinije nego li kroz vapnenac. Na otoku Visu na pr. bušeno je na jednom mjestu 45 m kroz glinu ispod koje je bio vapnenac. Kad je nabušena voda njen statički nivo održavao se je na 95 m, a to je još uvijek bilo cca 20 m iznad morske razine. Prema sl. 8. tome bi odgovaralo još 700 m slatke vode. U svakom slučaju moglo bi se riskirati i bušiti još izvjesnu dubinu ispod nivoa mora da se dobije što veća količina vode. Geofizičkim istraživanjima i to u prvom redu mjerenjem prividnog specifičnog otpora, a eventualno i refrakcijskom seizmikom može se utvrditi debljina tih mekih naslaga i odrediti bušotinu na mjestu, gdje je najviše mekanog materijala.

Ovo je sve rečeno s pretpostavkom da imamo posla s mrežom manjih međusobno povezanih pukotina i prema tome normalnim nivoom podzemne vode. U koliko ispod otoka protiče podzemna voda sa kopna, kao što je slučaj na Brionima, čitava situacija se naravno mijenja. Isto tako i prisustvo uložka nepropusnog materijala ili prisustvo većih podzemnih šupljina ili izoliranih pukotina naravno mijenja čitavu stvar. Kako će u tome slučaju izgledati odnos slatke i slane vode o tome još nemamo dovoljno iskustava. U svakom je slučaju dosadanje iskustvo pokazalo, da na svakom našem krškom otoku vrijedi pokušati bušenje na vodu u unutrašnjosti otoka, što dalje od kopna, pa izgleda da se tako počelo i raditi u praksi. Ja sam mišljenja, da bi trebalo pokušati bušiti i ispod razine mora i to samo u slučajevima kada je statički nivo vode u bušotini dovoljno visoko iznad razine mora. Naravno da i u tome slučaju postoji izvjestan riziko da u bušotinu prodre slana voda. Međutim s druge strane postoji vjerojatnost da se dobije znatno veća količina slatke vode. Svakako treba voditi računa o režimu crpljenja vode, na pr. da se crpka ostavi iznad razine mora.

Kod postavljanja bušotina može nam geofizičko istraživanje biti od velike koristi radi određivanja najjače raspucanoga terena. Time je u jednu ruku veća količina vode koju možemo očekivati, a osim toga veća je i vjerojatnost da se voda drži zakona u sl. 8. Veće pukotine ispunjene vodom ukoliko nisu preduboke, mogle bi se i direktno geofizički odrediti.

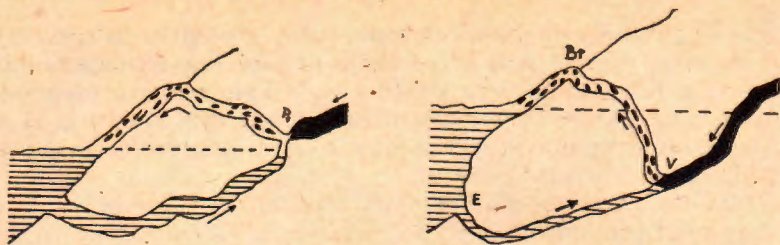
Granica slatke i slane vode pod kopnom određena je istim zakonom kao i pod otokom, nivo podzemne vode — ukoliko kao takav postoji — diže se prema unutrašnjosti kopna, a granica slane vode je sve dublja. Prema tome i ovdje dolazi kao glavno pravilo: bušiti što dalje od obale i po mogućnosti na što raspucanijem materijalu, što debljem nanosu i što nižoj koti.

Želio bih ovdje još spomenuti mogućnost da se geoelektričkim mjerenjem odredi direktno dubina granice između slatke i slane vode. Ovakova mjerenja u inozemstvu već su vršena, ali ne u kršu. Tako je na pr. BREUSE (18) kod Dakara dobio za pijesak zasićen slatkim vodom specifični otpor 50—150 Ω m, a za pijesak zasićen morskom vodom 0,4—1,3 Ω m.

Kod ovako velikih razlika određivanje granice je prilično sigurno. Kakav je specifični otpor stijene u kršu čije su pukotine ispunjene morskom vodom nisam našao podataka, niti su kod nas takova mjerenja vršena. Kao teoretski primjer uzeti ću jedan vapnenac u Austriji na kojem je V. FRITSCH (8) odredio specifični otpor prirodne stijene $\rho = 4700 \Omega$ m, specifični otpor čistog suhog vapnenca $\rho_g = 10.000 \Omega$ m, otpor vode u pukotinama $\rho_w = 50 \Omega$ m, volumen pukotine $\vartheta_w = 2\% = 0,02$ volumen suhe stijene $\vartheta_g = 98\% = 0,98$. Prema WIENEROVOJ formuli $1/\rho = \vartheta_w \cdot 1/\rho_w + \vartheta_g \cdot 1/\rho_g$ izlazi $\rho = 2000$ za otpor uzduž pukotina. Za stvarno mjereni otpor $\rho = 4700 \Omega$ m morali bi po gornjoj formuli biti volumen pukotine $\vartheta_w = 1,1\%$. Ako sada uzmemo da dotičnu stijenu sa 2% pukotine možemo u električkom pogledu zamijeniti sa stijenom, koja ima svega 1,1% pukotine, ali u smjeru prolaza struje (one su okomite na taj smjer kod tako malenog procenta pukotine praktički nemaju upliv na otpor) i sada uzmemo slučaj kada su sve ove pukotine ispunjene morskom vodom specifičnog otpora $\rho_w = 0,15 \Omega$ m. (po HEILANDU (19)) dobivamo $\rho =$ cca 14 Ω m. To je tako velika razlika otpora, da je i u tom slučaju određivanje granice slane vode vrlo sigurno. Ovo je naravno samo teoretsko razmatranje. Da li će i u kojim slučajevima, biti moguće određivati dubinu granice slane vode pokazati će praktična istraživanja na terenu.

Problem poluslanih vrela uz obalu.

Uz našu jadransku obalu nalaze se na mnogo mjesta izvori na obali nedaleko od mora, od kojih se veliki dio ne može upotrebiti, jer je voda poluslana. Problemom iskorišćavanja ovih izvora bavilo se je već više naših stručnjaka.



Sl. 9 — Miješanje morske i slatke vode radi dinamičkog podtlaka u suženom presjeku

Sl. 10 — Miješanje morske i slatke vode radi hidrostatske razlike težine

O. LEHMANN (20) je dao dva tipa ovakvih vrela — koje prikazuju sl. 9. i 10. Kod tipa u sl. 9. do ulaženja morske vode u tok slatke vode dolazi zbog toga, jer na spojnom mjestu P_1 u toku slatke vode postoji suženje presjeka, zbog čega na tom mjestu kod protjecanja vode dolazi do podtlaka i sisanja morske vode. Kod toga može točka P_1 ležati i iznad nivoa mora. Drugi tip (sl. 10) bazira na razlici specifične težine slatke i morske vode. Zbog veće specifične težine morske vode, ako je spojna cijev EV dovoljno duboko pod morem, a izlaz vrela dovoljno nisko nad morem, more ulazi u tok slatke vode. K. ĐURAŠIN (15. i 16.) navodi protiv prvog tipa vrlo uvjerljive prigovore i zaključuje, da se za gotovo sva naša obalska poluslana vrela može uzeti kao tip onaj iz sl. 10. ĐURAŠIN daje detaljnu matematsku analizu kretanja vode u tim tokovima i zaključuje da ulaženje ili neulaženje morske vode u tok slatke vode, ovisi između ostaloga o visini izvora B nad morem i dubini spojnice EV pod morem. ĐURAŠIN tako izračunava da na pr. za visinu izvora 0,5 nad morem na sve spojeve s morem koji se nalaze pliće od 18 m neće ni u kojem slučaju ulaziti morska voda. Ovo nam nameće pomisao kako bi u slučaju da podignemo nivo takovog vrela na pr. za još 0,5 m podizanjem ograde oko vrela, onda sve pukotine, koje se nalaze pliće od 36 m pod morem nebi više primale morsku vodu, dok one, koje su dublje, primat će u svakom slučaju manju količinu morske vode. Izdašnost izvora bi se kod toga naravno smanjila. U koliko time ne uspijemo smanjiti salinitet na podnošljiv iznos, moći ćemo na temelju određivanja saliniteta prije i poslije podizanja nivoa odrediti da li imamo uopće mogućnosti da na dotičnom vrelu na ovaj način postignemo uspjeh.

Za određivanje saliniteta nesumljivo je najbrža metoda mjerenja specifičnog otpora vode pomoću filoscopa ili sličnog uređaja. Princip filoscopa je jednostavan (21): dvije elektrode na međusobnoj udaljenosti oko 1 cm učvršćene na izolatoru urone se u vodu koju želimo ispitivati. Kroz elektrode pustimo izmjeničnu struju i metodom mosta izmjerimo otpor R između elektroda. Specifični otpor vode ρ bit će $\rho = K \cdot R$ gdje je K konstanta koja ovisi o geometrijskim dimenzijama i razmaku elektroda. Iz specifičnog otpora vode

dobivamo salinitet pomoću tabele ili diagrama izrađenog na temelju mjerenja otpora vode sa poznatim salinitetom (22). Zbog malih dimenzija elektroda ova sprava je vrlo praktična za mjerenje i u manjim izvorima, čak i pod morem. I. KUŠČER je ovom metodom određivao i salinitet izvora na obali i pod morem (23) i napominje, da su rezultati bili točni na 3% svoje vrijednosti, što za naše svrhe potpuno zadovoljava.

U slučaju kada ne uspije smanjiti slanost izvora podizanjem nivoa preostaju još drugi hidrotehnički radovi (zatvaranje pukotina kroz koje ulazi more cementom!) ili moramo geofizičkim metodama slijediti podzemni tok prema kopnu i nabušiti ga ondje, gdje se još nije pomiješao sa morskom vodom. Ova posljednja mogućnost otežana je time, što šupljine i pukotine ispunjene morskom vodom predstavljaju mnogo bolje vodiče nego li tok slatke vode, osim toga kod strme obale ubrzo ćemo biti tako visoko iznad podzemnog vodonosnika, da ga možemo osjetiti samo ako ima izvanredno veliki presjek.

U takvim slučajevima preostaje još mogućnost određivati smjer pukotina geoelektričkim mjerenjem — u koliko nije poznat već iz geoloških istraživanja — i zatim bušiti u tom smjeru, pretpostavljajući, da si je podzemna voda probila put uglavnom uzduž pukotina.

Podmorski izvori

Uz čitavu našu obalu i oko otoka vrlo česta su pojava podmorski izvori, negdje slabiji, negdje jači, a neki i tako jaki te izgleda kao da pod morem izlazi čitava podzemna rijeka. Pojava takvih izvora u bezvodnom kraju naravno mora dovesti ljude na pomisao da ih pokušaju iskoristiti za dobijanje slatke vode. Koliko mi je poznato vršeni su takovi pokusi u našoj zemlji i u inozemstvu, ali u literaturi do koje sam mogao doći nisam našao nikakvih rezultata.



Sl. 11. Dobivanje slatke vode iz podmorskog izvora

Za iskorišćavanje podmorskih izvora od bitne je važnosti da li je voda na izlazu iz izvora na morsko dno još slatka, ili se je već prije kroz neke pukotine pomiješala s morem. Ovo se može odrediti mjerenjem specifičnog otpora vode tako da se elektrode gurnu u izvor. Ovakova mjerenja provodio je uspješno I. KUŠČER na podmorskim izvorima ispod Velebita (23). Mjerenje treba provoditi u

najsušnijim mjesecima, jer je bitno da voda iz zemlje bude slatka onda kad je najviše potrebna.

Ukoliko je voda na izlazu iz podmorskog izvora slatka, odnosno ako je njen salinitet u dozvoljenim granicama, dovoljno je izvor sprovesti kroz jednu cijev do obale (sl. 11).

Iskorišćenje podmorskog izvora slatke vode.

Tlak koji vlada u proširenju cijevi E (sl. 11) ne dozvoljava ulazak morske vode u cijev, tako da zbog toga cijev ne bi niti trebalo zabetonirati, jer u koliko postoje šupljine između proširenja cijevi i morskog dna, kroz njih može jedino slatka voda izlaziti. Naravno da će betoniranje biti preporučljivo radi učvršćenja i radi toga da dio vode ne isteče oko cijevi. Po zakonu spojenih posuda voda se u cijevi mora dizati svakako do iznad razine mora i na obali može se jednostavno točiti, ali ne pumpati, jer time smanjujemo pritisak i morska voda može ulaziti u tok.

U slučaju da je voda na izlazu iz mora već u izvjesnoj mjeri slana preostaje mogućnost da se kaptira na isti način i da se cijev na izvoru dobro zabetonira. Time je podmorski izvor pretvoren u poluslani izvor i može se pokušati, produženjem cijevi na obalu i u vis povisiti tlak u podzemnom toku i analogno kao kod obalskih izvora smanjiti prtok slane vode. U koliko to ne uspije, preostaje ista mogućnost kao kod obalskih izvora: pokušati zatvoriti prilaze mora u tok ili slijediti podzemni tok ispod kopna.

ZAKLJUČAK

Na osnovu svega što je izneseno smatram da bi istraživanje i opskrbu vodom u kršu trebalo provoditi na slijedeći način:

Uz obalu i na otocima:

1. Podizanjem nivoa obalskih poluslanih vrela, pokušati smanjiti njihov salinitet. Salinitet određivati električki. Odrediti salinitet podmorskih izvora, izvore sa niskim salinitetom kaptirati prema sl. 11, onima sa višim salinitetom povisiti nivo vode na izlazu iz cijevi. Podmorske i obalske izvore, koji se ne bi dali na ovaj način iskoristiti, pokušati iskoristiti kompliciranijim kaptiranjem, ili kod povoljnih prilika slijediti im tok geofizički dublje u unutrašnjost i nabušiti ih prije nego se mogu miješati sa slanom vodom.
2. Geološkim i geofizičkim metodama odrediti zone najjače raspućanosti i najdebljeg mekanog pokrova i na tim mjestima što dalje od obale i na što nižoj koti izvršiti bušenje. Pokušati geofizički određivati nivo podzemne vode i granicu slatke i slane vode.

Na Istarskom poluotoku

Geoelektričkim sondiranjem pratiti vodene horizonte ustanovljene na otocima Brioni i na odgovarajućim mjestima izvršiti bušenja.

U ostalom krškom području

Geološkim i geofizičkim istraživanjima utvrditi eventualno postojanje vodenih horizonata ili nepropusnih barijera uz koje se može očekivati voda. Određivati zone jače raspucanosti radi lociranja bušotine. Pokušati pronalaženje podzemnih tokova i pukotinske vode geofizičkim putem.

Vjerojatno je, da će ubuduće istraživanje izmijeniti ovaj program i uputiti na mnoge nove momente kod istraživanja vode.

Zagreb, 18. XI. 1952.

LITERATURA

1. H. SCHNEIDER, Ch. Trullsen, H. Thiele, Die Wassererschliessung 1952.
2. KÖNIGSBERGER, Aufsuchung von Wasser mit geophysikalischen Methoden, Beiträge zur angewandten Geophysik, Bd. 3 (1933) str. 466—525.
3. C. A. HEILAND: Geophysical Exploration 1940, 744.
4. A. GRUND, Die Karsthydrographie, Studien aus Westbosnien. Geogr. Abd VII/3 1903, Leipzig.
5. KATZER F., Karst und Karsthydrographie, Sarajevo 1909.
6. SARNAVKA R., Otvaranje vodnih horizonata na Brionskim otocima. Geološki vjesnik Sv. II—IV, 1948-50 str. 151—176.
7. D. STEFANOVIĆ, Geoelektrična ispitivanja za vodu na Brionima Fažani i Aqua Grande 1951 (Tehnički izvještaj).
8. V. FRITSCH: Einige geoelektrische Untersuchungen mit Gleichstrom, Geofisica pura e applicata, 1949, 250—282.
9. Loc. cit. 1. str. 365.
10. LÖHNBERG A., STERN W., Ein neuer Weg der karsthydrographischen Forschungen durch Anwendung geoelektrischer Methoden. Zeitschrift für Geophysik 1932, str. 283—305.
11. Loc. cit. 2, str. 511.
12. H. REICH, Angewandte Geophysik für Bergleute und Geologen II. Teil 1934, 129—131.
13. A. J. ZABOROVSKIJ: Elektrorazvedka 1943. str. 248—252.
14. KEILHACK, Grundwasser und Quellenkunde II. Aufl. 1917, str. 162—165.
15. GJURAŠIN K., Prilog hidrografiji primorskog krša, Tehnički Vjesnik god. 59, 1942, br. 4—6.
16. GJURAŠIN K., Prilog hidrografiji krša, Tehnički Vjesnik god. 60, 1943, br. 1—2.
17. Loc. cit. 14, str. 491.

18. BREUSSE J. J., Le prospection électrique appliqué, recherche hydrologique dans la presquille de Dakar, A. O. F. Internat. Geol. Cong. Great Britain, 18th Sess. 1948.
19. Loc. cit. 3, str. 638.
20. O. LEHMAN, Die Hydrographie des Karstes
21. V. FRITSCH, Grundzüge der angewandten Geoelektrik 1947, str. 13.
22. Loc. cit. 1. str. 300.
23. KUŠCER J., Kraški izviri ob morski obali, Rasprava Slovenske Akademije znanosti i umjetnosti, Ljubljana 1950.

Željko Zagorac

PROSPECTING FOR WATER IN KARST AND THE USE OF APPLIED
GEOPHYSICS

SUMMARY

The importance of prospecting for water in karst for Yugoslavia is briefly shown. The principles of electrical exploration for water in general are given, and its importance is emphasised. Special hydrographic problems occurring in karst are discussed and decision about possibilities of geophysical explorations are drawn. The problem of determining the volume percentage of fissures is discussed. In connection with the experience of drilling and geophysical exploration on the islands of Brioni, where water horizons were determined, an enlarging of this work is proposed. Two examples from electromagnetic water exploration on the island Vis are given. The possibility of indirect finding of water in karst by geophysical methods is mentioned. Some examples from literature of geophysical prospecting for water in fissures and for underground flowing water are given.

The relation of sweet water and salt water in karst is discussed, and decisions about needed investigations are drawn. The problem of brackish springs along the coast is discussed and lowering of their salinity by elevating the niveau of water is proposed. The advantage of electric determination of salinity is emphasised. A proposal of making use of undersea sources of sweet water is given. Proposals for further exploration for water in karst are briefly summarised.